

**А. В. ЕФИМОВ, Ю. В. РОМАШОВ, В. Л. КАВЕРЦЕВ**

**ТЕМПЕРАТУРНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ И ОПТИМАЛЬНОЕ ОТНОШЕНИЕ ВНУТРЕННЕГО И НАРУЖНОГО РАДИУСОВ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЧАСТИ СОСУДОВ ДАВЛЕНИЯ ПАРОГЕНЕРИРУЮЩИХ УСТАНОВОК**

**АННОТАЦИЯ** Рассмотрено условие прочности цилиндрической части сосудов давления (барабанов, коллекторов, поверхностей нагрева и т.п.) парогенерирующих установок, в котором учтены напряжения от внутреннего давления и температурные напряжения. Предложена геометрическая интерпретация рассмотренного условия прочности, которая позволяет определять оптимальное с точки зрения прочности соотношение между внутренним и наружным радиусами цилиндрической части сосудов давления парогенерирующих установок.

**Ключевые слова:** парогенератор, паровой котёл, сосуд давления, цилиндрическая часть, прочность.

**A. YEFIMOV, Yu. ROMASHOV, V. KAVERTSEV**

**TEMPERATURE STRESSES AND OPTIMUM RATIO OF THE INNER AND OUTER RADII OF THE CYLINDRICAL PARTS OF PRESSURE VESSELS OF STEAM GENERATING SYSTEMS**

**ABSTRACT** The strength condition of the cylindrical parts of pressure vessels (water drums, collectors, heating surfaces, etc.) of steam-generating systems, which takes into account stresses due to the internal pressure and thermal stresses. Stresses due to internal pressure and temperature stresses are obtained using all-known results of the theory of elasticity for infinite cylinders. It is assumed that the strength of the cylindrical parts of pressure vessels of steam-generating systems is limited due to the formation of the plastic deformation in one point at least. The theory of maximum shear stress is used to formulate the strength condition. A geometric interpretation of the formulated strength condition is considered. The strength conditions for cylindrical parts of pressure vessels is reduced to the inequality that under given structural material properties restricts the possible values of the internal pressure and temperature drop across the wall thickness. The geometrical interpretation of the strength condition proposed for the cylindrical parts of pressure vessels in the base of the graphical representing of the solution of the inequality, corresponded to the strength condition. Graphical solution of the pressure vessels strength condition was presented on a coordinate plane the internal pressure – the temperature drop across the wall thickness. It is shown that the allowable by the strength condition the values of the internal pressure and temperature drop across the wall thickness in the coordinate plane occupies the limited area in the form of the right triangle. Proposed geometric interpretation allows us to determine the optimum value of the relationship between the inner and outer radii for the strength of cylindrical parts of pressure vessels of steam-generating systems.

**Keywords:** steam generator, steam boiler, pressure vessel, cylindrical part, strength

**Введение**

Корпусные части сосудов давления (барабанов, поверхностей нагрева) парогенерирующих установок выполняют преимущественно в виде длинных толстостенных круговых цилиндров. Характерные для парогенерирующих установок значительные тепловые потоки вызывают высокие температуру металла и ее перепад по толщине стенки, что заметно ограничивает прочность цилиндрической части сосудов давления как из-за снижения допускаемых напряжений конструкционных сталей с увеличением их температуры, так и вследствие температурных напряжений, вызываемых градиентом температуры.

Заметное повышение тепловой экономичности парогенерирующих установок осуществляется в первую очередь за счет увеличения давления и температуры вырабатываемого пара, что характерно как для паровых котлов, так и для парогенераторов АЭС [1–5]. Возможности увеличения температуры и давления вырабатываемого пара ограничены, главным образом, прочностью сосудов давления, из-за чего прочности сосудов давления

парогенерирующих установок уделяется большое внимание [6–9].

**Цель работы**

В настоящее время представляется, что в перспективных паровых котлах будет производиться пар суперсверхкритических параметров с высоким давлением, превосходящим 24 МПа, и высокой температурой, достигающей 700–760 °С [4]. В таких котлах влияние температурных напряжений на прочность цилиндрической части сосудов давления необходимо учитывать при обосновании толщины стенок. Целью данной работы является определение оптимального с точки зрения прочности отношения внутреннего и наружного радиусов цилиндрической части сосудов давления парогенерирующих установок с учетом температурных напряжений. Для реализации сформулированной цели предполагается решение задач о формулировке условия прочности с учетом температурных напряжений и условия оптимальности с точки зрения прочности отношения внутреннего и наружного радиусов цилиндрической

части сосудов давления парогенерирующих установок.

### Расчётная схема цилиндрической части сосудов давления парогенерирующих установок

Цилиндрическую часть сосудов давления парогенерирующих установок выполняют в виде толстостенного цилиндра с наружным радиусом, намного меньшим длины образующей. В качестве основных внешних воздействующих факторов рассматриваем внутреннее давление  $p$  рабочей среды и тепловые потоки от высокотемпературных рабочих сред. Рассматриваем прочность только центральной части сосудов давления, поскольку именно в центральной части имеют место наибольшие тепловые потоки, а концевые части расположены в зоне относительно невысоких температур.

Обозначим  $r_1$  и  $r_2$  внутренний и наружный радиус цилиндрической части сосудов давления. Поскольку наружный радиус  $r_2$  значительно меньше длины образующей, рассматриваем цилиндрическую часть сосудов давления в рамках гипотез плоской задачи термоупругости [10, 11]. Температурное и напряженное состояние цилиндрической части сосудов давления рассматриваем в полярных координатах  $r$ ,  $r_1 \leq r \leq r_2$  и  $\theta$ ,  $0 \leq \theta \leq 2\pi$ . Принимаем, что внутреннее давление рабочей среды равномерно распределено в точках внутренней поверхности цилиндрической части, и что тепловые потоки порождают в цилиндрической части осесимметричное поле температуры [10, 11]:

$$T(\rho) = T_2 + (T_1 - T_2) \frac{\ln(\rho)}{\ln(\rho_1)}, \quad \rho_1 \leq \rho \leq 1, \quad (1)$$

где  $T$ ,  $T_1$  и  $T_2$  – температура в произвольной точке, в точках на внутренней и наружной боковой поверхности цилиндрической части;  $\rho = r/r_2$  – относительная радиальная координата;  $\rho_1 = r_1/r_2$ .

Для поля температуры (1) с помощью результатов термоупругости [10, 11] получаем осесимметричные напряжения в цилиндрической части сосудов давления, включающие напряжения от внутреннего давления и температурные напряжения:

$$\begin{aligned} \sigma_r(\rho) &= \frac{p\rho_1^2}{1-\rho_1^2} \left(1 - \frac{1}{\rho^2}\right) + \\ &+ \frac{\alpha E}{2(1-\nu)} \frac{T_2 - T_1}{\ln \rho_1} \left( \ln \rho + \frac{\rho_1^2}{1-\rho_1^2} \left(1 - \frac{1}{\rho^2}\right) \ln \rho_1 \right), \\ \sigma_\theta(\rho) &= \frac{p\rho_1^2}{1-\rho_1^2} \left(1 + \frac{1}{\rho^2}\right) + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &+ \frac{\alpha E}{2(1-\nu)} \frac{T_2 - T_1}{\ln \rho_1} \left( 1 + \ln \rho + \frac{\rho_1^2}{1-\rho_1^2} \left(1 - \frac{1}{\rho^2}\right) \ln \rho_1 \right), \\ \sigma_z(\rho) &= \frac{2\nu p \rho_1^2}{1-\rho_1^2} + \\ &+ \frac{\alpha E}{2(1-\nu)} \frac{T_2 - T_1}{\ln \rho_1} \left( 1 + 2 \ln \rho + \frac{2\rho_1^2 \ln \rho_1}{1-\rho_1^2} \right), \quad (2) \end{aligned}$$

где  $\sigma_r$ ,  $\sigma_\theta$  и  $\sigma_z$  – радиальное, окружное и осевое напряжения;  $\alpha$ ,  $E$  и  $\nu$  – коэффициент температурного расширения, модуль упругости и коэффициент Пуассона материала, которые представлены своими значениями, усреднёнными в интервале  $[T_1, T_2]$  температуры.

Принимаем, что прочность цилиндрической части сосудов давления ограничена образованием пластической деформации хотя бы в одной точке; используем теорию максимальных касательных напряжений [11], которая приводит к неравенству:

$$2\tau_{\max} \leq \sigma_T, \quad \tau_{\max} = (\sigma_1 - \sigma_3)/2, \quad (3)$$

где  $\tau_{\max}$  – максимальное касательное напряжение;  $\sigma_T$  – предел текучести материала;  $\sigma_1 = \max(\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z)$  и  $\sigma_3 = \min(\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z)$  – максимальное и минимальное главные напряжения.

### Условие прочности цилиндрической части сосудов давления

Анализ напряжений (2) показывает, что максимальное значение величины (3) максимального касательного напряжения имеет место на внутреннем радиусе  $\rho = \rho_1$  цилиндрической части сосуда давления. С учетом этого обстоятельства, напряжений (2) и неравенства (3) для цилиндрической части сосудов давления после несложных преобразований получим условие прочности, ограничивающее внутреннее давление  $p$  и величину  $\Delta T = T_2 - T_1$  перепада температуры по толщине стенки:

$$\begin{aligned} \frac{p}{p_{\max}(\rho_1)} + \frac{\Delta T}{\Delta T_{\max}(\rho_1)} &\leq 1, \\ p_{\max}(\rho_1) &= \frac{\sigma_T}{k(\rho_1)}, \quad \Delta T_{\max}(\rho_1) = \frac{2(1-\nu)\sigma_T}{\alpha E \kappa(\rho_1)}, \quad (4) \end{aligned}$$

где  $k(\rho_1) = \frac{2}{1-\rho_1^2}$ ;  $\kappa(\rho_1) = \frac{1}{\ln \rho_1} + \frac{2}{1-\rho_1^2}$ .

В условии (4)  $p_{\max}(\rho_1)$  – это максимальная величина внутреннего давления, выдерживаемого цилиндрической частью сосуда давления в однородном, отвечающем  $\Delta T = 0$ , поле температуры. Величина  $\Delta T_{\max}(\rho_1)$  в условии (4) – это максимальный перепад температуры по толщине, выдерживаемый цилиндрической частью сосуда давления при гипотетическом условии, что внутрен-

нее давление  $p = 0$ . Для определения зависимостей  $p_{\max}(\rho_1)$  и  $\Delta T_{\max}(\rho_1)$  требуются значения предела текучести, коэффициента температурного расширения, модуля упругости, коэффициента Пуассона конструкционной стали, которые необходимо выбрать в соответствие с расчетной температурой стенки.

Геометрическая интерпретация условия (4) состоит в следующем: множество допускаемых условием прочности (4) величин внутреннего давления  $p$  и перепада  $\Delta T$  температуры по толщине для цилиндрической части сосудов давления с заданными свойствами материала и соотношением  $\rho_1$  внутреннего и наружного радиуса, занимают заштрихованную область, показанную на рис. 1.

#### Оптимальное отношение внутреннего и наружного радиусов цилиндрической части сосудов давления

В качестве критерия выбора соотношения  $\rho_1$  внутреннего и наружного радиусов цилиндрической части сосудов давления используем условие максимума площади заштрихованной на рис. 1 фигуры, которое с учетом соотношений (4) приведет к условию максимума функции одной переменной

$$K(\rho_1) = \frac{1}{k(\rho_1) \cdot \kappa(\rho_1)}. \quad (5)$$

Функция (5) действительно имеет максимум (рис. 2), который можно найти из условия  $dK/d\rho_1 = 0$  с помощью известных [12] численных методов решения алгебраических уравнений. В результате, независимо от свойств материала и температуры стенки оптимальное отношение внутреннего и наружного радиусов цилиндрической части сосудов давления

$$\rho_1^{\text{opt}} \cong 0,28922. \quad (6)$$

#### Обсуждение результатов

Отношение (6) внутреннего и наружного радиусов отвечает значительной толщине стенки цилиндрической части сосудов давления и не зависит от внутреннего давления и температурного режима, тогда как внешние воздействующие факторы сосудов давления парогенерирующих установок отвечают ожидаемым техническим характеристикам, условиям и режимам эксплуатации. Условие (4) позволяет реализовать иной подход к выбору оптимальной величины отношения внутреннего и наружного радиусов цилиндрической части сосудов давления. Этот подход может состоять в определении величины  $\rho_1$ , которая максимизирует допускаемый условием прочности перепад  $\Delta T$  температуры по толщине стенки, при задан-

ном внутреннем давлении  $p$  и расчетной температуре  $T$  металла, что планируется рассмотреть в дальнейших исследованиях.

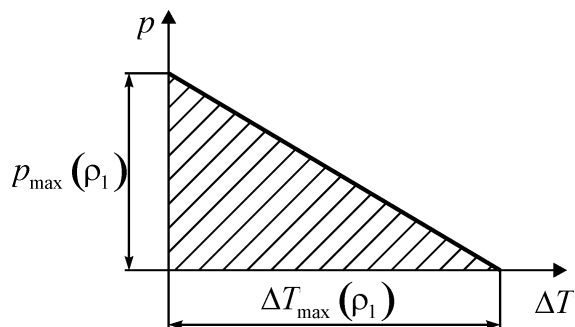


Рис. 1 – Геометрическая интерпретация условия прочности

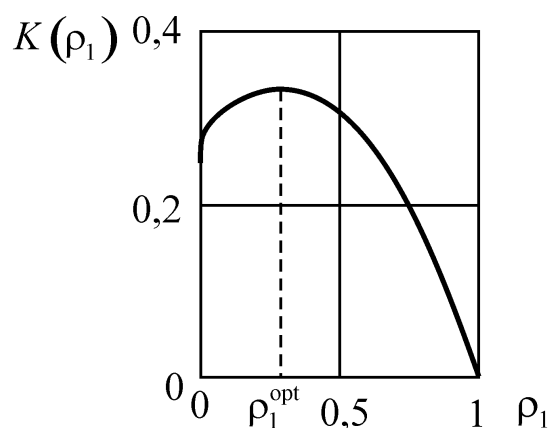


Рис. 2 – Определение оптимального отношения внутреннего и наружного радиусов сосудов давления

#### Выводы

С помощью известного решения плоской задачи термоупругости и критерия максимального касательного напряжения с учетом температурных напряжений исследована прочность цилиндрической части сосудов давления парогенерирующих установок. Показано, что зависимость между максимальным внутренним давлением и максимальным перепадом температуры по толщине стенки, допускаемыми условием прочности, является линейной; с увеличением внутреннего давления величина допускаемого перепада температуры по толщине стенки уменьшается. Наибольшая область возможных состояний цилиндрической части сосудов давления, которые удовлетворяют условию прочности, независимо от свойств конструкционной стали и температуры стенки обеспечивается при отношении (6) внутреннего и наружного радиусов.

## Список литературы

- 1 **Єфімов О. В.** Конструкції, матеріали, процеси і розрахунки реакторів і парогенераторів АЕС [Текст] / **О. В. Єфімов, М. М. Пилипенко.** – Харків : Видавництво «Підручник НТУ «ХПІ», 2010. – 268 с. – ISBN 978-966-2426-007.
- 2 Паровые и газовые турбины для электростанций [Текст] / **А. Г. Костюк, В. В. Фролов, А. Е. Булкин, А. Д. Трухний** ; под ред. А. Г. Костюка. – М. : Издательский дом МЭИ, 2008. – 556 с.
- 3 **Yongping Yang.** Comprehensive exergy-based evaluation and parametric study of a coal-fired ultra-supercritical power plant [Text] / **Yongping Yang, Ligang Wang, Changqing Dong, Gang Xu, Tatiana Morosuk, George Tsatsaronis** // *Applied Energy*. – 2013. – Vol. 112. – P. 1087–1099.
- 4 **Klarstrom, D. L.** Nickel-Base Alloy Solutions for Ultrasupercritical Steam Power Plants [Text] / **D. L. Klarstrom, L. M. Pike, V. R. Ishwar** // *Procedia Engineering*. – 2013. – Vol. 55. – P. 221–225.
- 5 **Usman Tariq Murtaza.** Optimization of the size and shape of the set-in nozzle for a PWR reactor pressure vessel [Text] / **Usman Tariq Murtaza, M. Javed Hyder** // *Nuclear Engineering and Design*. – 2015. – Vol. 284. – P. 219–227.
- 6 **Morachkovskii, O. K.** Continual model of propagation of corrosion cracks for the evaluation of the service life of structures [Text] / **O. K. Morachkovskii, Yu. V. Romashov** // *Materials Science*. – 2010. – Vol. 46, No. 2. – P. 254–259.
- 7 **Sinclair, G. B.** A review of simple formulae for elastic hoop stresses in cylindrical and spherical pressure vessels: What can be used when [Text] / **G. B. Sinclair, J. E. Helms** // *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. – 2015. – Vol. 128. – P. 1–7.
- 8 **Kunio Hasegawa.** Collapse loads for circumferentially through-wall cracked pipes subjected to combined torsion and bending moments [Text] / **Kunio Hasegawa, Yinsheng Li, Kazuya Osakabe** // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2014. – Vol. 123. – P. 77–85.
- 9 **Bin Ma.** Assessment on failure pressure of high strength pipeline with corrosion defects [Text] / **Bin Ma, Jian Shuai, Dexu Liu, Kui Xu** // *Engineering Failure Analysis*. – 2013. – Vol. 32. – P. 209–219.
- 10 **Timoshenko, S.** Theory of elasticity [Text] / **S. Timoshenko and J. N. Goodier**. – New York – Toronto – London : MCGRAW-HILL BOOK COMPANY, Inc., 1951. – 506 p.
- 11 **Timoshenko, S.** Strength of Materials. Part II: Advanced theory and problems [Text] / **S. Timoshenko**. – Toronto – New York – London : D. VAN NOSTRAND COMPANY, Inc., 1940. – 510 p.
- 12 **Ostrowski, A. M.** Solution of equations and systems of equations [Text] / **A. M. Ostrowski**; 2nd ed. – New York : Academic Press, 1966. – 338 p.

## Bibliography (transliterated)

- 1 **Yefimov, A. V. and Pilipenko, N. N.** (2010), *Konstrukcii, materialy, procesy i rozrahunki reaktoriv i parogeneratoriv AES* [Structure, materials, processes and calculations of reactors and steam-generators of NPP], *Pidruchnyk NTU "KhPI"*, Kharkiv, Ukraine.
- 2 **Kostyuk, A. G., Frolov, V. V., Bulkin, A. E. and Truhniy, A. D.** (2008), *Parovye i gazovye turbiny dlja jelektrostantsij* [Steam and gas turbines for power plants], in **Kostyuk, A. G.** (ed.), *Izdatelskiy dom MEI*, Moscow, Russia.
- 3 **Yongping Yang, Ligang Wang, Changqing Dong, Gang Xu, Tatiana Morosuk and George Tsatsaronis** (2013), "Comprehensive exergy-based evaluation and parametric study of a coal-fired ultra-supercritical power plant", *Applied Energy*, no. 112, pp. 1087–1099.
- 4 **Klarstrom, D. L., Pike, L. M. and Ishwar, V. R.** (2013), "Nickel-Base Alloy Solutions for Ultrasupercritical Steam Power Plants", *Procedia Engineering*, no. 55, pp.221–225.
- 5 **Usman Tariq Murtaza and M. Javed Hyder** (2015), "Optimization of the size and shape of the set-in nozzle for a PWR reactor pressure vessel", *Nuclear Engineering and Design*, no. 284, pp. 219–227.
- 6 **Morachkovskii, O. K. and Romashov, Yu. V.** (2010), "Continual model of propagation of corrosion cracks for the evaluation of the service life of structures", *Materials Science*, vol. 46, no. 2, pp. 254–259.
- 7 **Sinclair, G. B. and Helms, J. E.** (2015), "A review of simple formulae for elastic hoop stresses in cylindrical and spherical pressure vessels: What can be used when", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, no. 128, pp. 1–7.
- 8 **Kunio Hasegawa, Yinsheng Li and Kazuya Osakabe** (2014), "Collapse loads for circumferentially through-wall cracked pipes subjected to combined torsion and bending moments", *Engineering Fracture Mechanics*, no. 123, pp. 77–85.
- 9 **Bin Ma, Jian Shuai, Dexu Liu and Kui Xu** (2013), "Assessment on failure pressure of high strength pipeline with corrosion defects", *Engineering Failure Analysis*, no. 32, pp. 209–219.
- 10 **Timoshenko, S. and Goodier, J. N.** (1951), *Theory of elasticity*, Mcgraw-Hill Book Company Inc., New York, Toronto, London.
- 11 **Timoshenko, S.** (1940), *Strength of Materials. Part II: Advanced theory and problems*, D. VAN NOSTRAND COMPANY, Toronto, New York, London.
- 12 **Ostrowski, A. M.** (1966), *Solution of equations and systems of equations*, 2nd ed., Academic Press, New York, USA.

## Сведения об авторах (About authors)

**Ефімов Александр Вячеславович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой парогенераторостроения, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина, e-mail: AVEfimov@Kpi.Kharkov.ua, ORCID 0000-0003-3300-7447.

**Yefimov Alexander** – Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Steam Generator Building Department, National of Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkov, Ukraine.

**Ромашов Юрий Владимирович** – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры парогенераторостроения, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина, e-mail: yu.v.romashov@gmail.com, ORCID 0000-0001-8376-3510.

**Romashov Yurii** – Doctor of Engineering Science, Docent, Professor of the Steam Generator Building Department, National Technical University “Kharkov Polytechnic Institute”, Kharkov, Ukraine.

**Каверцев Валерий Леонидович** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры парогенераторостроения, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина, e-mail: kavercev@rambler.ru.

**Kavertsev Valerii** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Docent of the Steam Generator Building Department, National Technical University “Kharkov Polytechnic Institute”, Kharkov, Ukraine.

*Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Ефимов, А. В.** Температурные напряжения и оптимальное отношение внутреннего и наружного радиусов цилиндрической части сосудов давления парогенерирующих установок [Текст] / **А. В. Ефимов, Ю. В. Ромашов, В. Л. Каверцев** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 9(1181). – С. 108–112. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2016.09.16.

*Please cite this article as:*

**Yefimov, A., Romashov, Yu. and Kavertsev, V.** (2016), “Temperature Stresses and Optimum Ratio of the Inner and Outer Radii of the Cylindrical Parts of Pressure Vessels of Steam Generating Systems”, *Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 9(1181), pp. 108–112, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2016.09.16.

*Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

**Єфімов, О. В.** Температурні напруження і оптимальне відношення внутрішнього і зовнішнього радіусів циліндричної частини посудин тиску парогенеруючих установок [Текст] / **О. В. Єфімов, Ю. В. Ромашов, В. Л. Каверцев** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 9(1181). – С. 108–112. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2016.09.16.

**АНОТАЦІЯ** Розглянуто умову міцності циліндричної частини посудин тиску (барабанів, колекторів, поверхонь нагріву і т.п.) парогенеруючих установок, в якому враховані напруження від внутрішнього тиску і температурні напруження. Запропоновано геометричну інтерпретацію розглянутої умови міцності, яка дозволяє визначати оптимальне з точки зору міцності співвідношення між внутрішнім і зовнішнім радіусами циліндричної частини посудин тиску парогенеруючих установок.

**Ключові слова:** парогенератор, паровий котел, посудини тиску, циліндрична частина, міцність.

*Поступила (received) 20.01.2016*